

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 62 (1971)
Heft: 5

Artikel: Hochspannungs-Polyäthylenkabel : Fortschritte in der Herstellung und Prüfung
Autor: Mühlethaler, R. / Ruchet, R. / Schmid, M.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915805>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Hochspannungs-Polyäthylenkabel

Fortschritte in der Herstellung und Prüfung

Von R. Mühlethaler, R. Ruchet, M. Schmid und J. Wagner, Cossonay-Gare

621.315.211
(Übersetzung)

Im Anschluss an die Beschreibung der ersten polyäthylenisolierten Hochspannungskabel und der bei diesen auftretenden Fehler beschreibt der Artikel die grosse Zuverlässigkeit der modernen Kabel bis 60 kV, die dank der Verbesserung der verwendeten Materialien, Änderungen der Konstruktion, sorgfältiger Fertigungsmethoden und ausgedehnter Kontrollmassnahmen erreicht werden konnte. Ein Studium der Literatur weist auf die Erfahrungen mit polyäthylenisolierten Kabeln bis 225 kV und solchen mit vernetztem Polyäthylen bis 138 kV hin.

Après une description des premiers câbles haute tension à isolation polyéthylène (PE) fabriqués et des défauts qu'ils présentaient, l'article montre comment la grande fiabilité des câbles actuels jusqu'à 60 kV a pu être obtenue grâce à une amélioration des matériaux utilisés, à des modifications de construction et aux soins apportés à la mise en œuvre et aux contrôles. Une étude de la littérature fait le point des expériences réalisées avec des câbles à isolation PE jusqu'à 225 kV et PE réticulé jusqu'à 138 kV.

1. Geschichtliches

Der Kunststoff Polyäthylen (PE) wurde 1933 in England entdeckt und vom Jahre 1937 [1]¹⁾ an in Versuchsmengen hergestellt. Seine ausgezeichneten dielektrischen Eigenschaften machten ihn zu einem interessanten Isolierstoff für elektrische Kabel, und schon 1939 wurde versuchsweise ein Fernmeldekabel mit PE-Isolation im Meer verlegt. Als während des Zweiten Weltkrieges die für England wichtigen Radaranlagen besonders hochwertige Koaxialkabel verlangten, wurde von 1940 an für diese Kabel ausschliesslich PE verwendet [2].

Die ersten Energiekabel mit PE-Isolation, ohne Schutzmantel, wurden in den USA zur Versorgung einer chemischen Fabrik verlegt, nämlich 1944: 3 kV, 600 m Länge und 1946: 5 kV, 1500 m Länge [3].

Von da an stieg die Betriebsspannung ständig; gegenwärtig sind zahlreiche 60...70-kV-Kabel vor allem in den USA und in Frankreich im Betrieb. Daneben sind in den USA und in Deutschland Versuchskabel von 110...138 kV und in Frankreich und Japan Versuchskabel von 225 kV teilweise unter Druck von SF₆ verlegt worden.

Die Schweiz ist nicht zurückgeblieben und hat 1947 in Europa das erste 20-kV-Kabel mit PE-Isolation und 1957 das erste, allerdings für besondere Bedingungen hergestellte 70/35-kV-Kabel verlegt [4]. Die Schweizer Kabelfabriken haben also vom Anfang an der Entwicklung teilgenommen.

Die nun folgenden Angaben stützen sich auf Erfahrungen einer Kabelfabrik, die 1952 nach 4jährigen Versuchen und Proben PE-Kabel von 3...30 kV lieferte. Die Herstellungs- und Betriebserfahrungen an über 100 km gelieferten Kabeln haben dieser gestattet, dem von der American Institute of Electrical Engineers 1957 in New York organisierten Second Symposium

on PE Wire and Cable Insulation einen Bericht vorzulegen über «For years of Experience with High-Voltage PE Power Cable».

Vielfältige Versuche haben seither Verbesserungen in der Herstellung und der Prüfung von Kabeln gebracht, die zusammen mit den Verbesserungen der Materialien ermöglichen, nun auch 60-kV-Kabel herzustellen.

2. Rohstoffe und ihre Verarbeitung, Aufbau der Kabel während der ersten Herstellungsjahre

2.1 Polyäthylen (PE)

Die verschiedenen Arten von PE unterscheiden sich hauptsächlich durch ihre Dichte, ihr Molekulargewicht, d.h. die Länge ihrer Makromoleküle und durch die im PE enthaltenen Stabilisatoren.

Die Dichte hängt von der Struktur der Makromoleküle ab. Ein PE niedriger Dichte, das man durch Polymerisation unter hohem Druck erhält und darum auch Hochdruck-PE genannt wird, hat eine verästelte Struktur, d.h. längs der Hauptkette zweigen kurze Ketten ab, die die Hauptkette auseinanderhalten, was die Dichte vermindert. Ein PE grosser Dichte oder ein Niederdruck-PE hat demgemäss eine geringere Verästelung als das PE niedriger Dichte.

Das Molekulargewicht von PE, oder die mittlere Länge der Makromoleküle wird meistens mit dem Schmelzindex MFI (melt flow index) angegeben, was praktisch nichts anderes ist als ein Mass für die Fliessgeschwindigkeit des geschmolzenen Materials. Ein niedriger Schmelzindex bedeutet zähflüssiges Material und lange Makromoleküle.

Die elektrischen Eigenschaften sind vom Schmelz-Index unabhängig. PE grosser Dichte und PE geringer Dichte haben praktisch den gleichen Verlustfaktor $\tan \delta$ und die gleiche rela-

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

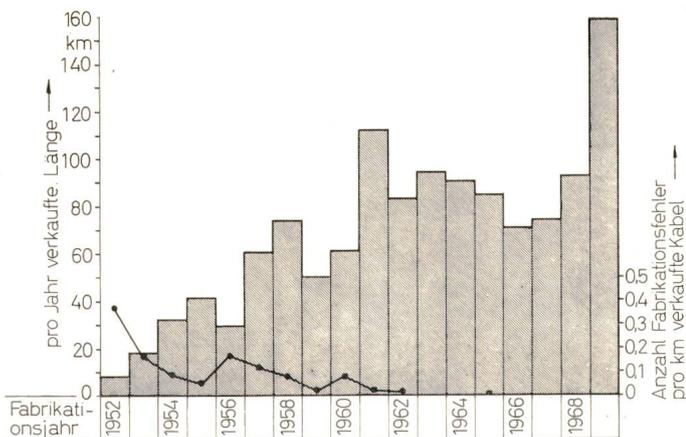


Fig. 1

Anzahl Fehler und verkaufte Längen zwischen 1952 und 1969

● Anzahl Fehler pro Jahr; □ jährlich verkaufte Länge

tive Dielektrizitätskonstante ϵ_r . Dagegen hat das PE hoher Dichte, wegen des stärkern Zusammenhangs der Moleküle, eine höhere dielektrische Festigkeit als das PE niedriger Dichte.

Die Stabilisatoren bewahren PE vor der Zersetzung bei hohen Temperaturen, denen es bei der Herstellung des Kabels ausgesetzt ist, sowie vor der Alterung im Betrieb. Ursprünglich wurden die Stabilisatoren nur zur Erhaltung der dielektrischen Eigenschaften des PE gewählt, und erst später wurden auch besondere Stabilisatoren zur Verbesserung der Isolationsfestigkeit entwickelt.

Das für Energiekabel anfänglich benützte PE hatte eine niedrige Dichte, einen Schmelzindex von 20, war für hohe Spannungen nicht besonders stabilisiert und war zudem weder besonders rein noch besonders sauber.

2.2 Kabelkonstruktion

Die ersten Kabel bestanden aus einem Kupferseil, das mit einer PE-Schicht umpresst war und auf der eine Umspinnung aus halbleitenden Papierbändern lag; darüber war ein Kupferband gewickelt, und das Ganze war mit einem PVC-Mantel umgeben.

2.3 Kabelherstellung

Das Umpressen mit Isolation wurde an den ersten Kabeln mit Schneckenpressen vorgenommen, die auch PVC verarbeiteten und die zusammen mit andern Maschinen in Hallen aufgestellt waren, wo vollkommene Staubfreiheit nicht möglich war.

Ausserdem waren die Kupferseile, trotz sorgfältiger Reinigung, gelegentlich mit Rückständen von Schmiermitteln oder Kupferstaub verschmutzt. Obwohl die Abkühlung fortschreitend von heissem zu kaltem Wasser in mehreren aufeinanderfolgenden Becken vorgenommen wurde, konnten innere Spannungen der Isolation nicht immer vermieden werden, weil die Abkühlungsdauer zu kurz war.

3. Fehlerstatistik an den von 1952 bis 1969 hergestellten Kabeln

In diesen 17 Jahren wurden 1200 km Kabel für Nennspannungen von 6...60 kV hergestellt. Eine Darstellung der ermittelten Fehler in Abhängigkeit der gesamten und jährlich hergestellten Kabel dürfte darum interessant sein. Dabei sind 2 Arten von Fehlern zu unterscheiden:

- Fabrikationsfehler wegen Unvollkommenheit des Herstellungsverfahrens oder des Ausgangsmaterials;
- Ungenügender Schutz gegen elektrische Entladungen oder gegen atmosphärische Ueberspannungen sowie Verlegefehler.

Vorerst ist zu bemerken, dass die meisten Fehler zur ersten Gruppe gehören; Fehler der zweiten Gruppe treten nur 1...2mal auf, und dies in den Zeitabschnitten von 1957 bis 1961 und von 1965 bis 1966.

Für die Beurteilung der Qualitätsverbesserung sind nur die Fehler der ersten Gruppe massgebend. Die Ergebnisse dieser Erhebung sind in Fig. 1 dargestellt; diese zeigt die verkaufte Kabellänge in den einzelnen Herstellungsjahren und die dazu gehörende Anzahl von Fabrikationsfehlern je km verkauften Kabels.

Es stellt sich wieder heraus, dass fast alle Fehler an Kabeln auftraten, die zwischen 1952 und 1960 hergestellt wurden. Ein einziger Fehler ereignete sich ausserhalb dieses Zeitabschnittes, im Jahre 1965. Diese Fehler sind entweder nach 1 Jahr oder nach 5...6 Jahren Betriebsdauer aufgetreten. Die schlechteste Fabrikationsperiode liegt zwischen 1952 und 1958; es darf aber mit Genugtuung festgestellt werden, dass die Anzahl Fehler pro km verkauften Kabel seit 1952 von 0,37 auf 0,02 zurückgegangen ist. Die Anzahl der Fehler je 100 km Kabel sind für die Zeitabschnitte

- 1952—1969: 3 Fehler pro 100 km
- 1952—1960: 7 Fehler pro 100 km
- 1961—1969: 0,5 Fehler pro 100 km

Zur Veranschaulichung der Art der Fabrikationsfehler seien 4 typische Photographien von Kabelquerschnitten gezeigt:

- Fehler A (Fig. 2)
Hohlraum in der Isolation, unmittelbar auf dem Seil, wahrscheinlich wegen Verdampfung von am Seil haftenden Wassers oder Fettes.
- Fehler B (Fig. 3)
Verästelungen, die von aussen und von innen ausgehen; ihre Ursache sind Ionisationen, die in Hohlräumen zwischen Leiter und Isolation und zwischen dem Band aus halbleitendem Papier und der Isolation entstanden. (Die vereinzelt, scheinbar von der Isolation eingeschlossene

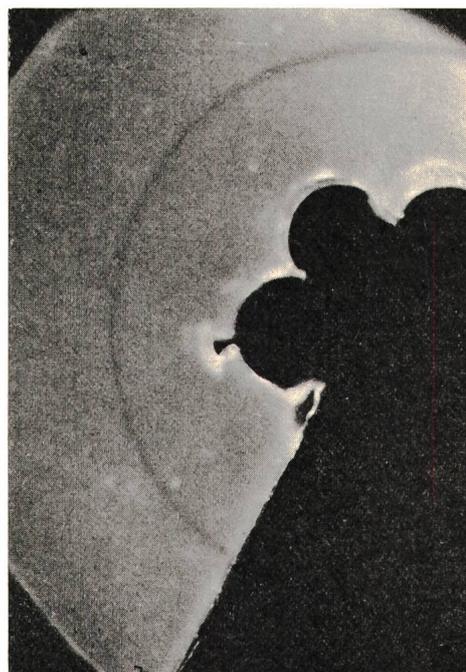


Fig. 2
Fehler A. Kabel TT 16/9,2 kV, 1×25 mm²
Vergrösserung: 9×

Verästelung ist in Wirklichkeit ein Querschnitt durch eine vom äusseren Rand der Isolation ausgehende Verästelung).

c) Fehler C (Fig. 4)

Verästelung um ein verkohltes PVC-Körnchen.

d) Fehler D (Fig. 5)

Braun-gelbe buschförmige Flecken mit zahlreichen, mikroskopisch kleinen Verästelungen von etwa 0.17mm Länge, die sich fast über die ganze Dicke der Isolation verteilen. Dieses Kabel war in etwa 2000 m Höhe installiert und elektrisch sehr stark beansprucht.

Die Kabel der 4 Beispiele hatten noch keinen Halbleiter über dem Seil und auch keinen auf der Aussenfläche der Isolation festanliegenden Halbleiter. Es sind dies Kabel des ersten, vor 1962 gelegenen Fabrikationsabschnittes.

4. Verbesserung der Kabelherstellung

Die vorher festgestellte zunehmende Verminderung von Fehlern ist folgenden Verbesserungen zuzuschreiben: bessere PE-Qualität, besserer Aufbau der Kabel, bessere Verarbeitung.

4.1 Qualität des PE

PE hoher Dichte hat gegenüber dem Hochdruck-PE folgende Vorteile:

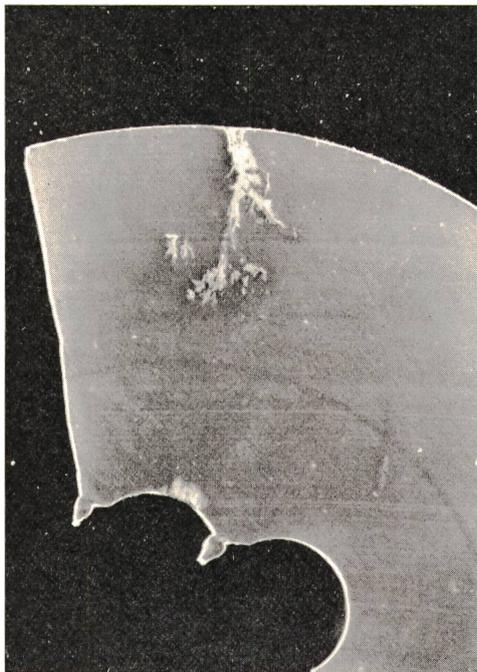


Fig. 3

Fehler B. Kabel TT 16/9,2 kV, 3×1×25 mm²
Vergrößerung: 11×

- a) Die Schmelztemperatur (130...135 °C) liegt über der Schmelztemperatur von PE niedriger Dichte (105...110 °C);
- b) Etwas höhere dielektrische Festigkeit;
- c) Grössere mechanische Festigkeit und grössere Abriebfestigkeit;
- d) Viel kleinere Durchlässigkeit von Wasserdampf.

Trotz dieser Vorteile verwenden alle Kabelfabriken für die Isolation von Hochspannungskabeln PE niedriger Dichte. Warum aber wird das PE hoher Dichte sozusagen nur für Mäntel von Seekabeln verwendet, wo doch seine bessere Wärmebeständigkeit die Gefahr einer Verformung der Isolation von Energiekabeln im Kurzschlussfall vermindern würde und seine grössere dielektrische Festigkeit es besonders geeignet für die Isolation von Hochspannungskabeln erscheinen lässt? Dafür gibt es drei Gründe:



Fig. 4

Fehler C. Kabel TT 16/9,2 kV, 1×35 mm²
Vergrößerung: 33×

- a) Das PE hoher Dichte ist steifer als das PE niedriger Dichte, was die Biegsamkeit der Kabel verringert.
- b) Die Gefahr innerer Spannungen ist bei PE hoher Dichte höher als bei PE niedriger Dichte. Je grösser aber innere Spannungen sind, um so grösser ist die Gefahr einer Verschlechterung der dielektrischen Festigkeit infolge Koronaeffektes, was bedeutet, dass das PE hoher Dichte eine kleinere Lebenserwartung hat als das PE niedriger Dichte.
- c) Die Verarbeitung des PE hoher Dichte ist heikler als die des PE niedriger Dichte, weil die Gefahr von Lufteinschlüssen, die die Ionisation begünstigen, grösser ist.

Die ersten Fabrikationsversuche wurden mit dem damals üblichen PE eines Schmelzindex von 20 gemacht. Sehr bald ging man über zu einem Schmelzindex von 7, dann zu 2, um heute bei 0,25, d.h. einem sehr hohen Molekulargewicht anzulangen. Das PE sehr niedrigen Schmelzindex hat den Vorteil, dem sog. «stress-cracking» weit besser zu widerstehen; als «stress-cracking» wird eine Spannungsrissskorrosion verstanden, die entsteht, wenn PE oder auch andere Kunststoffe gleichzeitig einer mechanischen Beanspruchung und dem Ein-



Fig. 5

Fehler D. Kabel TT 10/5,8 kV, 3×1×16 mm²
Vergrößerung: 200×

fluss eines chemischen Produktes (Detergentien, Alkohole, organische Säuren usw.) ausgesetzt wird, wobei die mechanische oder chemische Beanspruchung für sich allein praktisch wirkungslos sein kann. Diese Spannungsrisskorrosion hat am Anfang an PE-Kabeln in den USA und in England viele Schäden hervorgerufen, vor allem dort, wo die stark gefährdeten Schutzmäntel aus PE hohen Schmelzindexes bestanden. Wir selbst konnten nur zwei Fehler an Kabeln aus den Jahren 1953 und 1954 der Spannungsrisskorrosion zuschreiben.

Das PE altert, vor allem wegen Oxydation; seine Eigenschaften, besonders die mechanischen, verschlechtern sich. Um diese Erscheinung zu verzögern, wird dem PE ein Stabilisator beigefügt. Die Alterung einer Kabelisolation wird gewöhnlich als Lebenskurve, d.h. mit der dielektrischen Festigkeit bei verschiedenen Spannungen in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Die dazu nötigen Versuche müssen an Kabeln selbst oder an Kabelmustern gemacht werden, weil die Resultate nicht nur von den Eigenschaften des verwendeten Materials, sondern auch von der Herstellungsweise und dem Aufbau des Kabels abhängen. Dagegen genügen für Untersuchungen der Isoliermaterialien und des Einflusses von Stabilisatoren Versuche an gepressten Platten.

Das gegenwärtig für Hochspannungskabel verwendete PE enthält einen Stabilisator, der sich seit zehn Jahren bewährt hat und in zahlreichen Ländern verwendet wird. Verschiedene Hersteller versuchen aber einen Stabilisator zu finden, der erlaubt, mit grösseren maximalen Spannungsgradienten zu arbeiten und gleichzeitig eine genügende Lebensdauer zu gewährleisten. Andererseits haben die Hersteller von PE grosse Anstrengungen gemacht, um sauberes, trockenes und zweckmässig verpacktes PE zu liefern, um so die schädlichen Unreinheiten im Material zu vermeiden.

4.2 Verbesserungen des Kabelaufbaues

Um die Eigenschaften der Kabel, die anfänglich keinen Halbleiter über dem Kupferseil hatten, zu verbessern, wurde die Kabelkonstruktion mit umpresstem, an der Isolation vollständig anklebendem Halbleiter übernommen, was erlaubte, einige der genannten Fehlerquellen auszuschneiden.

Der umpresste Halbleiter auf dem Kupferseil bringt nämlich folgende Vorteile:

- a) Es bildet eine Schranke, die verhindert, dass Unreinheiten auf dem Seil das Isoliermaterial verschmutzen.
- b) Es gleicht die Oberfläche des Seiles aus, so dass ein homogenes elektrisches Feld entsteht.
- c) Es verhindert allfällige Hohlräume zwischen Seil und Isolation.
- d) Es bildet eine Wärmeschranke zwischen Leiter und Isolation.

Betrachten wir noch im einzelnen die Fehler, die entstehen können, wenn ein Halbleiter auf dem Seil fehlt:

a) Trotz grösster Sorgfalt in der Herstellung des Leiters (besonders gezogene Drähte, Entfetten des Kupferseiles, Einwickeln des Seiles in eine Papierhülle) können Einschlüsse von Unreinheiten und Bildung von Blasen, herrührend von verdampftem Wasser oder Schmiermittel, nicht vermieden werden.

b) Die gewellte Oberfläche des Seiles verursacht am äusseren Teil jedes Drahtes ein stärkeres elektrisches Feld, wodurch hier die Isolation stärker beansprucht und die Gefahr von Durchschlägen erhöht wird.

c) Wegen der mechanischen Beanspruchung des Kabels während der Herstellung und der Verlegung (Auf- und Abwickeln) und wegen der wechselnden thermischen Belastung des Kabels im Betrieb besteht stets Gefahr, dass sich das Seil von der Isolation löst. Das führt zu Hohlräumen, zur Ionisation der darin eingeschlossenen Luft und schliesslich zur Erosion der Isolation. Nur ein einwandfrei mit der Isolation verhafteter Halbleiter kann diese Gefahr bannen. Halb-

leiter aus PVC oder Butylkautschuk, wie sie zuweilen anfänglich in Form von Bändern oder umpressten Hüllen gebraucht wurden, genügten dieser Bedingung nicht, und zudem konnten die darin enthaltenen Weichmacher mit der Zeit in das PE eindringen und so dessen elektrischen Eigenschaften verschlechtern. Auf derartige Halbleiter wurde deshalb verzichtet. Auch ein Halbleiter aus PE und Russ hatte keinen Erfolg; es musste dem PE derart viel Russ beigefügt werden, dass das Gemisch zu bröckelig und nicht mehr pressbar wurde. Die Lösung wurde in einer Mischung von Russ mit einem Kopolymerisat aus Äthylen und Vinylacetat gefunden. Die gegenwärtig auf dem Markt erhältlichen Produkte haben einen elektrischen, an gepressten Platten mit Gleichstrom gemessenen Querwiderstand von $\leq 5 \Omega \text{ cm}$ und verschweissen sich sehr gut mit der PE-Isolation.

d) Bei einem Kurzschluss nimmt vorerst der Halbleiter die im Leiter erzeugte Wärme auf, so dass sogar gelegentliche Deformationen der PE-Isolation vermieden werden.

Der Einfluss des Halbleiters macht sich besonders bei Durchschlagversuchen mit Stoßspannung bemerkbar. Eine grosse Zahl derartiger Versuche wurde an 20-kV-Kabeln der laufenden Fabrikation vorgenommen. Die statistische Verarbeitung der erhaltenen Resultate erlaubte die Wahrscheinlichkeit eines Durchschlages in Abhängigkeit der Spannung zu berechnen. Fig. 2 zeigt diese Beziehungen für Kabel ohne und für Kabel mit Halbleiter. Man ersieht daraus, dass Kabel mit umpresstem Halbleiter eindeutig höhere Durchschlagsspannungen und eine kleinere Streuung haben als Kabel ohne Halbleiter.

An Einleiter-Kabeln, insbesondere aber an Dreileiter-Kabeln, wo die einzelnen Kabel wegen der Verseilung zusätzlich mechanisch beansprucht werden, wurde zuweilen eine Erhöhung des Verlustfaktors ($\text{tg } \delta$) festgestellt, wenn die Kabel mehrere Male auf- und abgewickelt wurden, allerdings ohne die nach den Regeln des SEV [7] zulässigen Werte zu überschreiten. Ausserdem war manchmal die Streuung der gemessenen Stossdurchschlagsspannungen gross, und zudem traten die Durchschläge in oder nahe der Deflektoren auf. Diese beiden Erscheinungen waren darauf zurückzuführen, dass das Halbleiterband auf der Isolation nicht satt auflag und so unerwünschte Zwischenräume zwischen Isolation und Band entstanden.

Um diese Unvollkommenheiten zu vermeiden, wird nun auf die Isolation ein gut haftender halbleitender Überzug und darüber ein graphitiertes Papier angebracht. Damit werden alle allfälligen Hohlräume im Papierwickel kurzgeschlossen; das Verhalten bei Überspannungen und die Lebensdauer werden somit verbessert.

Messungen des Verlustfaktors ($\text{tg } \delta$) von Dreileiter-Kabeln haben diese Verbesserungen bestätigt. Die maximalen Erhöhungen des Verlustfaktors ($\Delta \text{tg } \delta$) bei Meßspannungen von $0,5 U_0$ und $2,5 U_0$ sind z. B.:

| | Nach Verseilung der Kabel | Am fertigen Kabel |
|--------------------|---------------------------|-------------------|
| Kabel ohne Überzug | 1,2 ‰ | 1,8 ‰ |
| Kabel mit Überzug | 0,3 ‰ | 0,3 ‰ |

Es wurden auch Verlustwinkel-Messungen an zwei 30/17-kV-Einleiter-Kabeln von 240 mm^2 Querschnitt vorgenommen. Diese Kabel ohne halbleitenden Überzug wurden nach einer Betriebsdauer von 10 Monaten ausgebaut, und ihre Umhüllungen wurden durch eine neue Umhüllung mit einem halbleitenden Überzug ersetzt, der sonst nicht geändert wurde. Folgende Verlustfaktoren ($\text{tg } \delta$) wurden bei 50 Hz gemessen:

| | Kabel | U_0 | $1,5 U_0$ | $2,5 U_0$ |
|--|-------|-------|-----------|-----------|
| Kabel ohne halbleitenden Überzug vor der Verlegung | a | 0,44 | 0,47 | 1,16 |
| | b | 0,41 | 0,44 | 1,15 |
| Kabel ohne halbleitenden Überzug nach dem Ausbau | a | 0,47 | 2,44 | 5,95 |
| | b | 0,59 | 2,87 | 6,30 |
| Kabel nach Aufbringen eines halbleitenden Überzugs | a | 0,44 | 0,46 | 0,44 |
| | b | 0,43 | 0,43 | 0,40 |

Die Verbesserung der Kabel dank dieses halbleitenden Überzuges kann auch bei den Versuchen zum Nachweis von partiellen Entladungen festgestellt werden (diese immer häufiger angewandte Methode ist unter 6.2 beschrieben).

Ausser dem genannten Aufbau der halbleitenden Schicht, d.h. gut haftender halbleitender Überzug und Umspinnung mit graphitiertem Papierband oder mit halbleitendem synthetischem Gewebe, sind auch andere Lösungen möglich. Immer muss aber beachtet werden, dass die halbleitende Schicht sehr gut auf der Isolation haftet und gleichwohl, wegen der Montage des Kabelzubehörs, leicht und vollständig weggenommen werden kann. Der halbleitende Überzug eignet sich dazu gut, denn er lässt sich mit einem Lösungsmittel, z.B. Petrol, leicht entfernen. Seine Zusammensetzung ist aber sorgfältig zu wählen, damit er nicht rissig wird oder sich mit der Zeit von der Isolation löst. Eine andere Technik besteht darin, die halbleitende Schicht auf die noch heisse PE-Isolation am Ausgang der Schneckenpresse aufzubringen. Die Gefahr von Rissen und Ablösungen ist damit vermieden; das Entfernen mit Lösungsmitteln ist aber nicht mehr möglich, und es müssen mechanische Mittel eingesetzt werden, wobei aber sorgfältig darauf zu achten ist, dass die Isolation nicht verletzt wird. Es gibt verschiedene Methoden zur Verwirklichung dieses Prinzips. Am besten werden dazu 3 Schneckenpressen hintereinander auf-

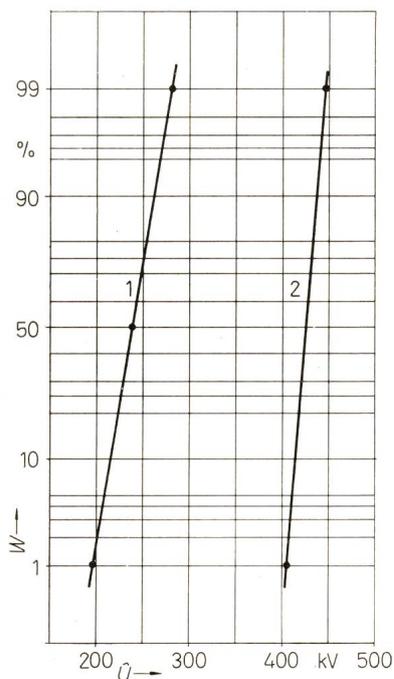


Fig. 6

Wahrscheinlichkeit eines Durchschlages bei Stoßbeanspruchung

Kabel 20/11,5 kV, $1 \times 25 \text{ mm}^2$

1 Kabel ohne Halbleiter auf dem Seil; 2 Kabel mit Halbleiter auf dem Seil

U Stoßspannung in kV; W Wahrscheinlichkeit eines Durchschlages in %

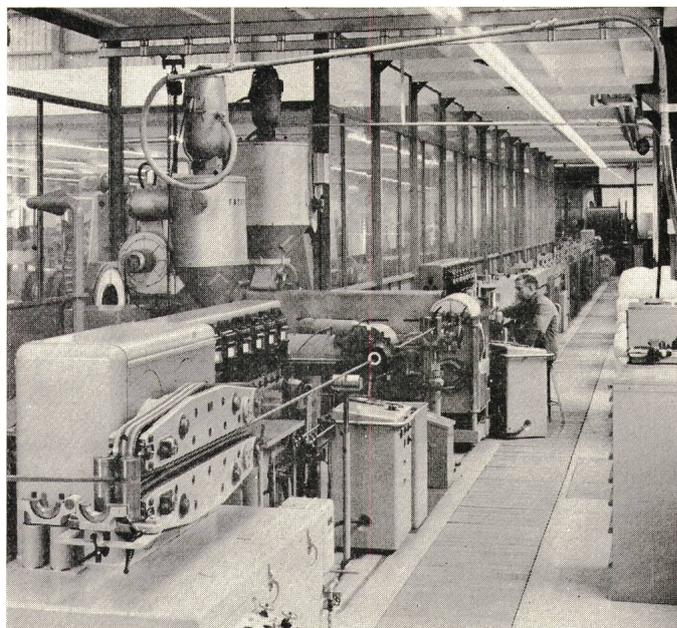


Fig. 7

Ansicht der unter Überdruck stehenden Kabine für die Isolierung von Hochspannungs-Polyäthylenkabeln

gestellt, wo die erste den Halbleiter auf das Seil presst, die zweite die Isolation aufbringt und die dritte den Halbleiter auf die Isolation presst. Ein anderes Verfahren besteht darin, dass auf die Isolation bei ihrem Austritt aus der Schneckenpresse eine wässrige Dispersion von Russ aufgespritzt wird. Noch ein anderes Vorgehen ist vorgeschlagen worden: Das Kabel, dessen Isolation an der Oberfläche mittels einer Flamme leicht aufgeschmolzen wurde, wird durch einen mit Graphitpulver gefüllten Behälter gezogen.

4.3 Verbesserungen der Herstellung

Das heute für die Isolierung von Hochspannungskabeln gelieferte PE ist sauber und rein, und es muss nur noch darauf geachtet werden, dass es in diesem Zustand in die Schneckenpresse gelangt. Dazu wird das PE pneumatisch angesaugt, indem ein Rohr durch eine gerade genügende Öffnung in den gelieferten Verpackungssack eingeführt wird. Ein als Sonde in den Sack eingeführtes Hygrometer kontrolliert den Feuchtigkeitsgehalt des PE-Granulates, das zur Sicherheit unmittelbar vor dem Einfülltrichter mittels eines besondern Apparates noch getrocknet wird.

In gleicher Weise wird auch das Granulat der Halbleiter getrocknet.

Damit ein wirkliches Verschweissen des Halbleiters auf dem Seil mit der Isolation stattfindet, werden die beiden Stoffe mittels zweier hintereinanderliegender Schneckenpressen in einem Arbeitsgang aufgebracht; der Abstand zwischen den Schneckenpressen ist so gewählt (etwa 4 m), dass der Halbleiter noch warm und leicht plastisch ist, wenn er vom PE umhüllt wird.

Die für die Isolierung der Hochspannungskabel vorgesehene Schneckenpresse wird für keine andern Arbeiten benutzt; sie verarbeitet nur PE für Hochspannungskabel, um zu vermeiden, dass trotz sorgfältiger Reinigung allfällige Rückstände anderer Materialien, wie z.B. PVC oder gefärbtes PE usw., die Isolation verunreinigen könnten.

Ausserdem ist die ganze Fertigungsstrasse, bestehend aus den beiden Schneckenpressen für die Isolierung und den Halb-

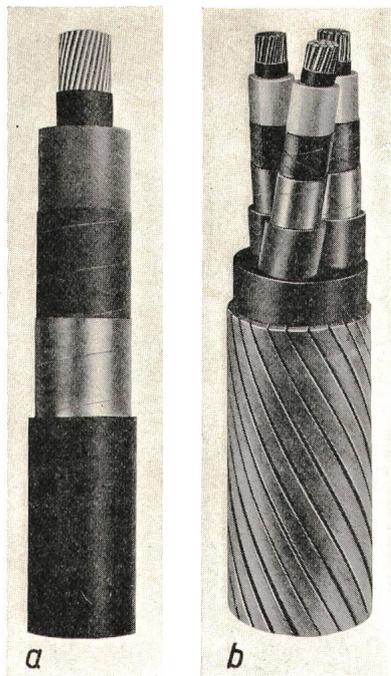


Fig. 8

Gegenwärtiger Aufbau eines einpoligen (a) und eines 3-poligen (b) Kabels

leiter sowie den Einrichtungen für das Auf- und Abwickeln, in einem besondern Lokal untergebracht, das sich unter leichtem Überdruck befindet, um so das Eindringen von Staub zu verhindern (Fig. 7). Damit innere Spannungen in der Isolation weitgehend vermieden werden, sind die Kühlstrecken verlängert, und das Abfließen des PE erleichtert worden, indem die Formen im Innern des Spritzkopfes besonders ausgewählt und die Presstemperaturen sorgfältig angepasst wurden.

5. Aufbau und Eigenschaften der gegenwärtigen Kabel

5.1 Aufbau

Ausser den in den Regeln des SEV 0216.1959 [7] vorgesehenen ein- und dreipoligen Kabeln von 6...30 kV werden heute auch einpolige Kabel für 60 kV hergestellt; solche Kabel stehen seit kurzem in Betrieb. Die einpoligen Kabel haben einen Leiter aus Kupfer oder aus Aluminium, einen aufgespressten Halbleiter aus einem Ätylen-Kopolymerisat, eine aufgespresste PE-Isolation, die vollkommen mit dem Halbleiter verschweisst

ist, einen Halbleiter über der Isolation, bestehend aus einem Überzug und einer Umspinnung aus graphitisiertem Papier, einen leitenden Schirm aus einer Umspinnung von einem oder mehreren Kupferbändern und schliesslich einen thermoplastischen Mantel (Fig. 8). Die dreipoligen Kabel bestehen aus drei miteinander verseilten einpoligen Kabeln, den Beiläufen und einem thermoplastischen Mantel, der allenfalls von einer Armierung überdeckt ist.

5.2 Stossdurchschlagsspannung

Da Gefahr besteht, dass Hochspannungskabel atmosphärischen Überspannungen ausgesetzt sind, schreiben die Regeln des SEV 3001.1964 [8] eine Stoss-Haltespannung für die verschiedenen Nennspannungen vor (Tabelle I). Es ist darum unerlässlich, dass die Durchschlagspannung bei Stoss und deren Streuung bestimmt wird, damit die verlangten Werte garantiert werden können.

Wegen der ausserordentlich kleinen Leitfähigkeit des PE dauert es sehr lang, bis die Ladungen, herrührend von Überspannungen, abgeflossen sind. Es darf angenommen werden, dass die Zeitkonstante für Gleichstrom $\tau = RC$ einer PE-Kabelisolation mindestens $2\frac{1}{2}$ Tage ist; dann dauert es ungefähr 12 Tage bis die Ladungen abgeflossen sind (bei einem Papierkabel ginge es 70mal schneller). Es ist darum möglich, dass bei einer nachfolgenden Überspannung, die gegenteiliger Polarität sein kann, in der Isolation noch Ladungen der vorangegangenen Überspannung vorhanden sind, was selbstverständlich die elektrische Beanspruchung der Isolation erhöht. Die Durchschlagversuche müssen darum mit wechselnder Polarität vorgenommen werden [9], wenn man die Resultate zum Vergleich mit der wirklichen Beanspruchung und nicht nur zum Vergleich mit andern Kabeln benützen will.

Um den Einfluss von Querschnitt, Isolationsdicke, Aufbau und Herstellung festzustellen, muss eine statistische Untersuchung vorgenommen werden, wozu aber eine grosse Anzahl Messungen nötig sind, wenn kennzeichnende Resultate erhalten werden sollen.

Ein Beispiel, dargestellt in Fig. 6, zeigt die Wahrscheinlichkeit eines Durchschlages an einem Kabel TT 20/11, 5 kV, 25 mm² in Abhängigkeit von der Stoßspannung. Die dielektrische Festigkeit bei Stoss (1...5/40...60 μ s) wechselnder Polarität, bei Umgebungstemperatur und bei Betriebstemperatur ist im ungünstigsten Fall grösser als 70 kV/mm. Die neuesten Ver-

Tabelle I

| Nennspannung des Kabels | kV | 6/3,5 | 10/5,8 | 16/9,2 | 20/11,5 | 30/17,3 | 60/34,6 |
|---|-------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| E_{\max} bei 50 Hz ¹⁾ (im Betrieb) | kV/mm | 2,6...2,2 ¹⁾ | 3,0...2,4 | 3,3...2,4 | 3,3...2,5 | 3,6...2,8 | 4,3...3,7 |
| E_{mittel} bei 50 Hz (im Betrieb) | kV/mm | 2,1 | 2,2 | 2,1 | 2,1 | 2,3 | 2,4...2,6 |
| Stosshaltespannung (nach SEV 3001.1964) | kV | 60 | 75 | 95 | 125 | 170 | 325 |
| E_{\max} bei Stosshaltespannung | kV/mm | 56...47 | 39...31 | 45...33 | 36...27 | 35...28 | 41...35 |

$$E_{\max} = \text{maximaler Spannungsgradient} = \frac{2U}{d \cdot \ln D/d}$$

$$E_{\text{moy}} = \text{mittlerer Spannungsgradient} = \frac{2U}{D - d}$$

U = Spannung (kV); $D = \phi$ über der Isolation (mm);

$d = \phi$ über dem Halbleiter (mm)

¹⁾ Der erste Wert von E_{\max} entspricht dem kleinsten, der zweite dem grössten in der betreffenden Spannungsreihe hergestellten Querschnitt.

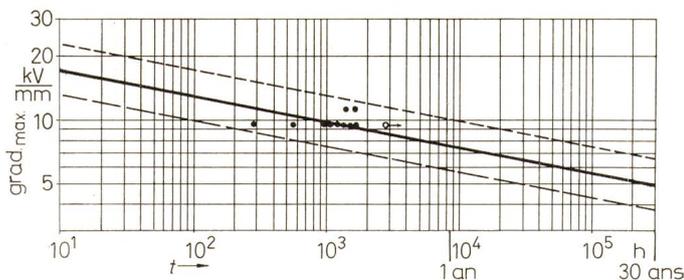


Fig. 9

Lebensdauer in Abhängigkeit der maximalen Feldstärke

Die gemessenen Werte (• o→) betreffen 20/11,5 kV Kabel von 1×25 mm² Querschnitt. • gegenwärtige PE-Qualität: Dauer bis zum Durchschlag; o→ neue PE-Qualität: die Kabel haben noch nicht durchgeschlagen; die Versuche dauern an.

Suchergebnisse zeigen, dass diese dielektrische Festigkeit von 20-kV-Kabeln bis auf 120 kV/mm gesteigert werden kann, was den in der Literatur [10...13] genannten Werten entspricht. Vergleicht man die in Tabelle I genannten Werte der Stoss-Haltespannung und die entsprechenden Spannungsgradienten mit den oben genannten Werten, so stellt man fest, dass die Durchschlagsspannungen sogar den Stossanforderungen des höhern Spannungsniveaus genügen. So liegt z.B. die Stoss-Durchschlagsspannung eines 60/35-kV-Kabels zwischen 820 und 900 kV; die verlangte Stoss-Haltespannung ist für dieses Kabel 325 kV und für ein 150/87-kV-Kabel 750 kV. Dieses Beispiel zeigt, dass die gegenwärtigen PE-Kabel eine mehr als nur genügende Sicherheit gegen atmosphärische Überspannungen aufweisen.

5.3 Dielektrische Festigkeit und Lebensdauer bei 50 Hz

Messungen der Lebensdauer an fertigen Kabeln unter Betriebsspannung sind wegen ihrer langen Dauer selbstverständlich praktisch nicht möglich. Darum werden die Versuche mit höhern Spannungen durchgeführt und die gefundenen Werte durch Extrapolation auf die Betriebsspannung umgerechnet [10]. Die Spannungsgradienten dürfen aber nicht zu hoch gewählt werden, weil sonst Durchschläge vorkommen könnten, die bei niedrigerer Spannung nicht auftreten würden.

Die Messresultate aus fertigen Kabeln sind in der Fig. 9 graphisch dargestellt und lassen eine gute Übereinstimmung mit den Angaben in der Literatur [10; 14] erkennen.

Um den Einfluss des Querschnitts und der Dicke der Isolation auf die Lebensdauer beurteilen zu können, muss eine grosse Zahl von Versuchen gemacht werden. Unter der Voraussetzung, dass die Zahl der Messungen genügt und dass die Zeiträume bis zu den Durchschlägen entsprechend der Verteilung nach Weibull [15] streuen, darf aber das Gebiet langer Lebensdauer durch Extrapolation bestimmt werden, was erlaubt, wesentlich Zeit zu sparen. Andererseits verlangen schon geringe Änderungen am Material oder am Aufbau eine Wiederholung der zeitraubenden Messungen.

Gestützt auf Versuche an vor einigen Jahren hergestellten Kabeln kann die Lebensdauer *t* von Kabeln nach folgender Formel berechnet werden:

$$\text{PE-Kabel: } t = \frac{3,1 \cdot 10^{11}}{E_{\max}^{8,5}}$$

$$\text{Papier-Bleikabel PPb: } t = \frac{3,3 \cdot 10^{10}}{E_{\max}^{7,3}}$$

darin bedeuten: *t* Lebensdauer in Stunden; *E*_{max} maximaler Spannungsgradient in kV/mm.

Den zahlenmässigen Zusammenhang zwischen diesen Grössen zeigt folgende Tabelle:

| t h | E _{max} (kV/mm) | |
|--------------------|--------------------------|-----------|
| | Kabel TT | Kabel PPb |
| 4 | 19,1 | 22,8 |
| 24 (1 Tag) | 15,1 | 17,9 |
| 720 (1 Monat) | 10,4 | 11,2 |
| 262 800 (30 Jahre) | 5,2 | 5,0 |

Nach Tabelle I beträgt der maximale Spannungsgradient in den gegenwärtigen Kabeln bei Betriebsspannung 2,2...4,3 kV/mm; er liegt also unter dem für eine Lebensdauer von 30 Jahren errechneten Wert. Unter Berücksichtigung der gemachten Fortschritte am Isoliermaterial, der Herstellung usw., dürfte also der betriebsmässig zulässige Spannungsgradient höher sein. Die Tendenz geht dahin, einen Spannungsgradienten zwischen 5 und 6 kV/mm zuzulassen, und für die Zukunft fasst man sogar noch höhere Werte ins Auge [11...13, 16...19].

Der mittlere, allgemein anzutreffende Spannungsgradient variiert zwischen 2,2 und 3,0 kV/mm; die besprochenen Kabel sind für ≤ 2,6 kV/mm dimensioniert.

5.4 Zulässige Belastung im normalen Betrieb

Die Publikation 0216.1959 des SEV [7] legt die zulässigen Ströme in PE-Kabeln von 6...30 kV fest; die Verlegearten und die Betriebsweisen sind die gleichen wie für Kabel mit imprägnierter Papierisolation, d.h. Verlegetiefe = 70 cm, Bodentemperatur 25 °C, maximale Leitertemperatur 60 °C für 6-kV-Kabel und 50 °C für 10...30-kV-Kabel; in Analogie dazu hat man bisher auch für 60-kV-Kabel 50 °C zugelassen.

Da das PE gegenüber dem imprägnierten Papier eine bessere thermische Leitfähigkeit hat und zudem ohne Gefahr eine maximale Temperatur von 70 °C erträgt [11; 12; 16], ist es durchaus möglich, dass höhere Belastungen als bisher zugelassen werden könnten.

5.5 Zulässige Belastungen im Kurzschluss und kurzzeitige Überlastungen

Der zulässige Kurzschlussstrom ist manchmal ausschlaggebend für die Wahl des Querschnitts.

Für die Berechnung dieses zulässigen Stromes wird eine zulässige Temperatur am Leiter angenommen und gestützt darauf die Stromstärke berechnet, die in einer gegebenen Zeit diese Temperatur bewirken würde, wobei angenommen wird, dass alle während des Kurzschlusses erzeugte Wärme im Leiter selbst gespeichert bliebe (adiabatische Erwärmung). Der mit der Vernachlässigung der Wärmeübertragung auf die PE-Isolation gemachte Fehler ist bis zur Kurzschlussdauer von 3 Sekunden klein. Die zulässige Endtemperatur des Leiters ist somit eine der entscheidenden Eigenschaften. Es ist also abzuklären, welche Leitertemperatur gerade noch keinen Schaden am Kabel verursacht (Exzentrizität des Leiters, Verminderung der elektrischen Eigenschaften).

Die in einer Kurzschlussanlage an verschiedenen Kabeln gemachten Messungen zeigen, dass eine maximale Temperatur von 160 °C im Kurzschlussfall zugelassen werden kann, ohne dass das Kabel leidet.

Wenn der Leiter zu Beginn des Kurzschlusses die im Normalbetrieb maximal zulässige Temperatur von 60 °C bzw. 50 °C hat, beträgt also die zulässige Erwärmung 100 °C in 6-kV-Kabeln und 110 °C in 10...60-kV-Kabeln.

Die bei Versuchen gemachten Feststellungen [11] sind:

- a) Selbst bei einer 10 s langen Erwärmung auf 150 °C konnte kein Wandern des PE festgestellt werden;
- b) Bei langdauernden Überlastungen (100 h) bis zu 115 °C am Leiter konnte kein sichtbares Wandern des PE bemerkt werden.
- c) Wenn die Leitertemperatur ≤ 140 °C ist, hat der Kurzschluss keinen Einfluss auf das elektrische Verhalten des Kabels.

Der kurzzeitig maximal zulässige Strom I_{ec} kann mit guter Annäherung wie folgt berechnet werden:

wenn A = Querschnitt des Leiters in mm^2

t = Dauer des Kurzschlusses in Sekunden

dann ist für

$$\text{Kupferleiter} \quad I_{ec} \approx 122 \text{ A}/\sqrt{t}$$

und für

$$\text{Aluminiumleiter} \quad I_{ec} \approx 81,5 \text{ A}/\sqrt{t}$$

Bei mehr als 3 s dauernden Kurzschlüssen oder Überlastungen darf die Übertragung der Wärme in die PE-Isolation nicht mehr vernachlässigt werden, ansonsten sich zu kleine Werte für den maximal zulässigen Strom ergeben würden. Allgemein gültige Angaben können darüber nicht gemacht werden; es muss jeder einzelne Fall besonders berechnet werden. Dazu ist ein Programm für einen Computer aufgestellt worden, das erlaubt, die Leitertemperatur in Abhängigkeit der Zeit zu berechnen.

Hier muss wohl auch noch daran erinnert werden, dass die Kabel entsprechend der zu erwartenden maximalen Kurzschlussströme zu verlegen und eventuell zu befestigen sind, wenn Beschädigungen vermieden werden sollen.

5.6 Erwärmung und Widerstand des Schirmes aus Kupferbändern

Es ist praktisch nicht möglich, den Ohmschen Widerstand der schraubenförmig aufgewickelten Bänder mit genügender Genauigkeit zu berechnen. Messungen haben gezeigt, dass der Widerstand des Schirmes mit steigendem Strom abnimmt.

Dieser Effekt ist dem direkten Übertritt des Stromes von Spirale zu Spirale zuzuschreiben. Dieser wird durch die Erwärmung und den dadurch verbesserten Kontakt zwischen den Spiralen hervorgerufen. Der wirksame Widerstand nähert sich so dem Widerstand eines Kupferzylinders, dessen Dicke gleich der Dicke des Kupferbandes ist. Der in der Publ. 0216.1959 des SEV [7] genannte Fehlerstrom von 50 A ertragen die vorgesehenen Schirme ohne weiteres.

5.7 Dielektrische Verluste

Diese sind in PE-isolierten Kabeln bei Betriebsspannung sehr klein. Das Isoliermaterial PE hat einen Verlustfaktor $\text{tg } \delta = 0,2\%$, der von der Temperatur und von der Frequenz praktisch unabhängig ist. Wegen der in den Kabeln vorhandenen Halbleiter ist aber der Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ der Isolation etwas grösser, bleibt aber unter 1 %.

Die dielektrischen Verluste in Abhängigkeit der Nennspannung der Kabel sind:

| | | | | | | |
|------------------|---|-----|----|----|----|---------|
| Nennspannung kV: | 6 | 10 | 16 | 20 | 30 | 60 kV |
| Verluste W/km: | 3 | 4,5 | 6 | 8 | 13 | 36 W/km |

6. Besondere Versuche

6.1 Versuche am PE

Die dielektrische Festigkeit ist die wichtigste Eigenschaft des in Hochspannungs-Energiekabeln verwendeten PE. Gleich-

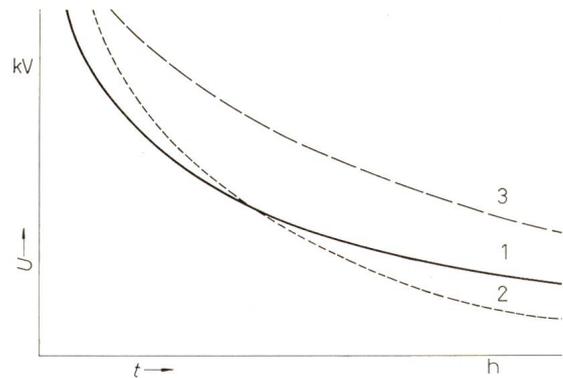


Fig. 10

Elektrische Zeitstandfestigkeit des PE

- 1 PE mit normalem Stabilisator; 2 PE mit Stabilisator A für Hochspannung; 3 PE mit Stabilisator B für Hochspannung
- t Dauer bis zum Durchschlag in h; U angelegte Spannung in kV

zeitig ist sie aber die am schlechtesten erklärable Eigenschaft; man kennt eben den theoretischen Verlauf eines Durchschlages noch nicht genau genug.

Verschiedene Methoden sind vorgeschlagen worden, um an Platten diese dielektrischen Festigkeiten, also die Lebensdauer von unter Spannung stehendem Isoliermaterial und den Einfluss von Stabilisatoren zu bestimmen. Weil die gefundenen Werte vor allem vergleichbar sein müssen, sind nur Methoden zulässig, die eine Reproduzierbarkeit garantieren.

Die erste solche Methode, der sog. «Nadel-Test», ist in den USA [20; 21] entwickelt worden. Sie besteht grundsätzlich darin, dass an einem kleinen PE-Block, der einen genormten Fehler enthält, die Zeit bis zum Erscheinen der Entladungsspuren gemessen wird. Praktisch wird das Prüfstück zwischen einer glatt aufliegenden Platte und einer dazu senkrecht in die Isolation hineingedrückten Nadel unter Spannung gesetzt, d.h. also einem elektrischen Streufeld ausgesetzt. Dabei sind Prüfling und Elektroden in ein Ölbad getaucht. Die mit dieser Methode gemachten eigenen Messungen haben die von den Autoren angegebenen Resultate nicht bestätigt.

Eine andere Versuchsanordnung besteht im wesentlichen darin, dass aufeinandergeschichtete PE-Blätter, die ein kleines genormtes Loch enthalten, unter Spannung gesetzt werden. Die von Dritten an Kabeln gemessene Lebensdauer entsprach den Werten aus der Versuchsanordnung, womit aber ausser dem Interesse nur gezeigt wurde, dass die Isolation der untersuchten Kabel Löcher enthielt.

Kürzlich wurde eine neue Methode zur Feststellung der dielektrischen Festigkeit von PE bekanntgegeben [22], mit der auch die Wirksamkeit von beigefügten Stabilisatoren für Hochspannungsisolierungen gemessen werden soll. Diese Methode vermeidet die Mängel des «Nadel-Testes» und scheint reproduzierbare Resultate zu liefern. Dieses Verfahren kann darum zur Untersuchung und zum Vergleich verschiedener PE-Muster und zur regelmässigen Kontrolle des zu verarbeitenden PE benutzt werden. Es besteht grundsätzlich aus der Bestimmung der Durchschlagspannung einer PE-Platte in Abhängigkeit von der Zeitdauer. Dazu wird die eine Seite der Platte metallisiert und in der Mitte der andern Seite eine konische metallisierte Vertiefung angebracht; an diesen beiden Elektroden wird die Spannung angelegt, und das Ganze wird in Öl getaucht. Die Fig. 10 zeigt den mit dieser Anordnung gemessenen Einfluss von Stabilisatoren für Hochspannung auf die Lebens-

dauer. Eine Verbesserung ist selbstverständlich nur nützlich, wenn sie dauernd ist, d.h. wenn die Kurven der verbesserten Lebensdauer überall oberhalb der Lebensdauerkurve des normal stabilisierten PE liegen, wie das Kurve 2, nicht aber Kurve 3 zeigt.

6.2 Kontrolle der Teilentladungen

Die in der Elektrotechnik verwendeten Isoliermaterialien haben selten eine vollständig zusammenhängende, homogene Struktur; gewöhnlich befinden sich darin Hohlräume verschiedenster Form und Grösse. Diese enthalten Gase mit Dielektrizitätskonstanten, die unterhalb der des umgebenden Isolierstoffes liegen. Die Feldstärke E_c in den Hohlräumen ist nicht nur wegen der kleineren Dielektrizitätskonstanten, sondern auch wegen der Form der Hohlräume grösser als die Feldstärke E im Dielektrikum. Die vorkommenden Hohlräume sind im allgemeinen kugelförmig und haben einen Durchmesser von etwa 0,1...0,3 mm. Je nach Grösse und Lage der Hohlräume haben diese einen mehr oder weniger grossen Einfluss auf die Lebensdauer der Kabel; man muss sie deshalb feststellen können.

Dafür gibt es mehrere Methoden und Einrichtungen. Die gewählte Methode für fertige Kabel ist die sog. Kontrolle an abgeglichenen Kreisen mittels eines Differentialdetektors vom Typ α für Entladungen mit breitem Frequenzband [23]. In dieser Anordnung bleibt der Detektor theoretisch unempfindlich auf Störungen, herrührend vom Hochspannungskreis (Koronaentladungen in Luft an Hochspannungsverbindungen oder im Transformator selbst). Ein gewichtiger Nachteil dieser Methode ist, dass für die Versuche 2 Kabel gleichen Typs und möglichst gleicher Länge verwendet werden müssen. Die Versuche werden entsprechend den Empfehlungen der Arbeitsgruppe «Décharges partielles» des Comité d'Etudes 21 der CIGRE [23] in 3 verschiedenen Schaltungen vorgenommen.

Um die Empfindlichkeit der Messmethode und die Wichtigkeit einer guten leitenden Umhüllung zu zeigen, werden nachfolgend einige Messergebnisse verschiedener Kabel dargestellt.

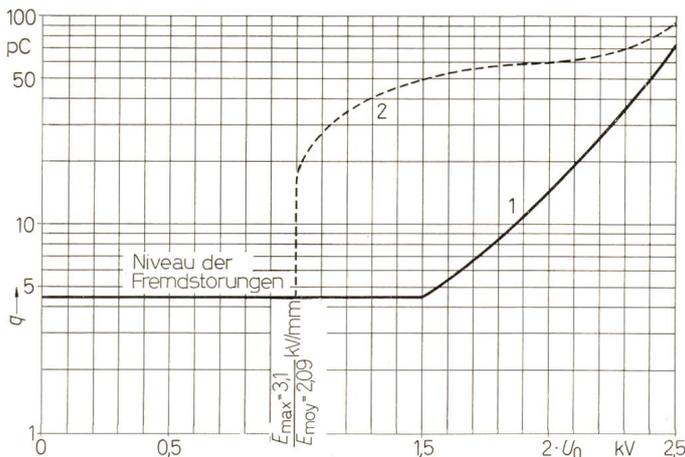


Fig. 11
Amplitude der Teilentladung

in Abhängigkeit der angelegten Spannung für zwei 16/9,2 kV PE-Kabel von 25 mm² Querschnitt und Längen von 2006 und 2015 m
1 gesundes Kabel; 2 Kabel mit künstlich hergestelltem Fehler; die äussere halbleitende Schicht wurde an einem Kabelende auf einer Fläche von 3 cm² entfernt, und das darüberliegende halbleitende Papier so gelöst, dass an der Fehlerstelle ein Zwischenraum von ≈ 1 mm entstand
 q Amplitude der Teilentladungen in pC; U_0 Nennspannung Leitermantel in kV; E_{max} max. Feldstärke; E_{moy} mittlere Feldstärke bei Nennspannung

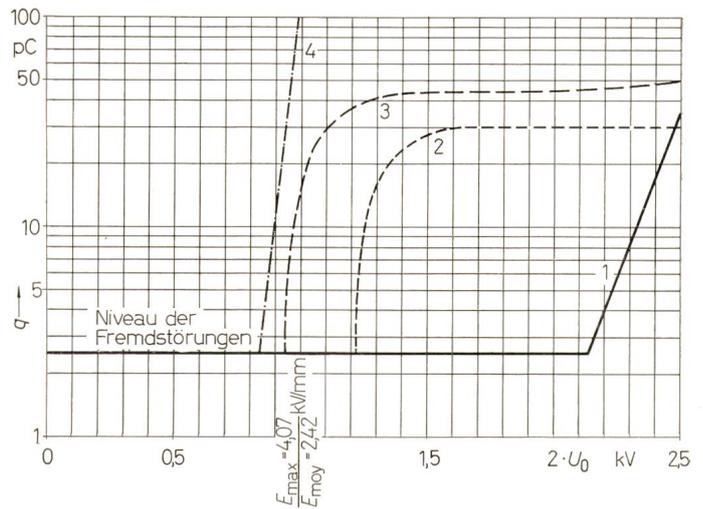


Fig. 12

Amplitude der Teilentladungen

in Abhängigkeit der angelegten Spannung für zwei 60/34,7 kV von 150 mm² und Längen von 240 und 242 m
1 gesundes Kabel; 2 Kabel mit künstlich hergestelltem Fehler; die äussere halbleitende Schicht wurde an einem Kabelende auf einer Fläche von 3 cm² entfernt. Das halbleitende Papier wurde über die Fehlerstelle gewickelt und fest angepresst. 3 gleich wie 2, jedoch das halbleitende Papier mit 1 mm Zwischenraum über der Fehlerstelle; 4 künstlicher Fehler an einem Kabelende, scheibenförmiger Hohlraum (1 mm³) nahe beim inneren Halbleiter
 q Amplitude der Teilentladungen in pC; U_0 Nennspannung Leitermantel in kV; E_{max} max. Feldstärke bei Nennspannung; E_{moy} mittlere Feldstärke bei Nennspannung

In Fig. 11 ist die Teilentladung in Abhängigkeit von der Spannung $q = f(U)$, an zwei PE-Kabeln, Typ TT 16/9 kV, 1 \times 25 mm², dargestellt. Kurve 1 zeigt das Verhalten eines gesunden, Kurve 2 das eines künstlich beschädigten Kabels. Diese Beschädigung bestand darin, dass an einem Kabelende vom halbleitenden Überzug 3 cm² entfernt wurden, und dass an derselben Stelle das Band aus graphitisiertem Papier so gelockert wurde, dass etwa 1 mm grosse Zwischenräume entstanden. Es ist deutlich erkennbar, dass die Ionisation am beschädigten Kabel früher eintritt, und dass der Pegel der Entladung steigt.

Fig. 12 zeigt die Messresultate an PE-Kabeln für 60 kV. Auch hier entspricht die Kurve 1 einem gesunden Kabel; die Kurven 2 und 3 betreffen zwei Kabel, an deren Ende der Halbleiterüberzug wie vorher 3 cm² Oberfläche entfernt wurde. Am Kabel der Kurve 2, wurde das graphitierte Papierband wieder in seinen ursprünglichen Zustand gebracht, wogegen am Kabel der Kurve 3 das graphitierte Papierband wie vorher gelockert war.

Schliesslich wurde in einem Kabel (Kurve 4) künstlich ein zylindrischer Hohlraum von etwa 1 mm³ Volumen und 1 mm Durchmesser nahe des Halbleiters auf dem Kupferleiter angebracht. Deutlich sichtbar ist der günstige Einfluss der Halbleiter-Umspinnung; die Ionisation am Kabel mit korrekt aufgebrauchten Halbleiter tritt später ein. Im künstlichen Hohlraum treten die Entladungen noch früher, bei ungefähr 0,85 U_0 auf.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass der in PE-Hochspannungskabeln maximal zulässige Pegel der Entladungen gegenwärtig mit 40 pC bei 1,25 U_0 festgelegt ist. Die Kurven zeigen, dass an gesunden Kabeln dieser Pegel tiefer liegt, dass aber an den fehlerhaften Kabeln die Entladung unterhalb 1,25 U_0 eintritt und der Pegel sehr rasch den Pegel der gesunden Kabel übersteigt.

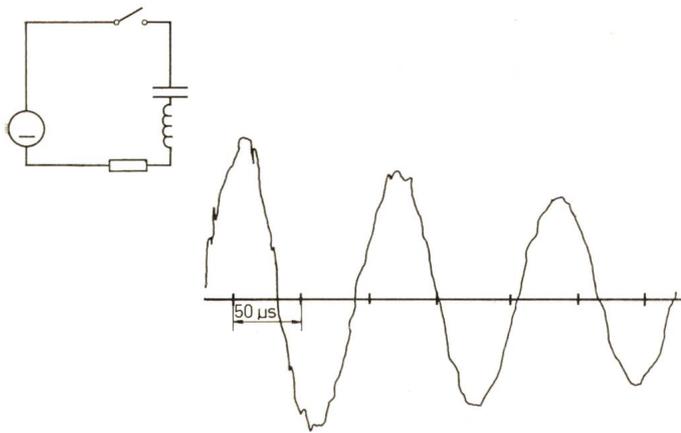


Fig. 13

Prinzipschema des Versuchskreises und Verlauf der oszillierenden Entladung

Die mit dieser Messmethode gemachten Erfahrungen lehren, dass die heutige Kontrolltechnik für fertige Kabel ergänzt werden muss mit Beobachtungen der Entladungen im Oszilloskop. Damit können nicht nur allfällige irreführende Störungen aufgespürt, sondern auch die mögliche Ursache der Entladungen diagnostiziert werden. Diese Versuchsmethode ersetzt aber die systematische Messung der dielektrischen Verluste in PE-Kabeln nicht, weil erst diese die Kontrolle des auf den Leiter oder die Isolation aufgepressten Halbleiters gestattet. Eine halbleitende Schicht mit einem zu grossen spezifischen Widerstand ergibt ja ein zu hohes $\text{tg } \delta$. Dieser Befund stützt sich auch auf Beobachtungen anderer Kabelfabriken [25]. Zusammenfassend darf ohne Zweifel festgestellt werden, dass mit der verbesserten Empfindlichkeit des Verfahrens zum Aufspüren von Teilentladungen in fertigen Kabeln und mit einer systematischen Benützung dieses Verfahrens als zusätzliche Fabrikationskontrolle auch eine zusätzliche Garantie für eine einwandfreie Herstellung und damit für die Lebensdauer geboten wird.

6.3 Oszillierende Entladungen

Im Betrieb kommen laufend Überspannungen vor; sie sind zum grossen Teil auf Ein- oder Ausschaltungen zurückzuführen und können in Netzen mit isoliertem Nullpunkt Werte bis $3,5 U_0$ mit Eigenfrequenz von 2...10 kHz annehmen. Auch in gewissen Sonderfällen, wie z. B. bei der periodischen Speisung

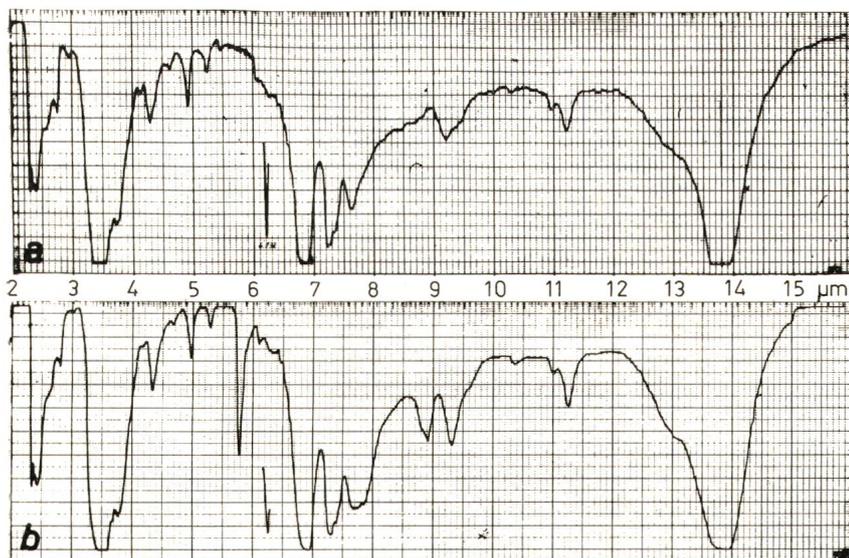


Fig. 15
Spektrogramm IR von PE-Probestücken
a normales PE
b oxydiertes PE

von Magneten in Teilchenbeschleunigern hat man mit ähnlichen Erscheinungen zu tun. Um das Verhalten der Kabel bei derartigen Bedingungen abzuklären, sind mehrere 20-kV-Kabelstücke alle 4 s oszillierenden Entladungen einer Eigenfrequenz von etwa 8,5 kHz und einem Dämpfungsfaktor von etwa 1,1 ausgesetzt worden. Fig. 13 zeigt das Schaltschema und die Form der benutzten Welle; Fig. 14 stellt die Anzahl Entladungen, die für einen Durchschlag nötig sind in Funktion der angewandten maximalen Spannung dar.

6.4 Untersuchung der Alterung von PE mittels Infrarot-Spektralphotometrie

Diese Untersuchung wurde an einem PE-Hochspannungskabel, das nach 6 Jahren Betrieb durchgeschlagen hatte, vorgenommen. Die im Laboratorium gemachten Prüfungen haben keine Auskunft über die Ursache des Durchschlages gegeben; es konnten im PE weder Verunreinigungen noch Bläschen noch Verästelungen gefunden werden. Dagegen lag der Verlustwinkel, der vorher zwischen 0,2...0,4‰ variierte zwischen $\text{tg } \delta = 0,2...1,6\%$. Es stellt sich deshalb die Frage, ob die Alterung eine chemische Strukturänderung zufolge hatte, die mittels

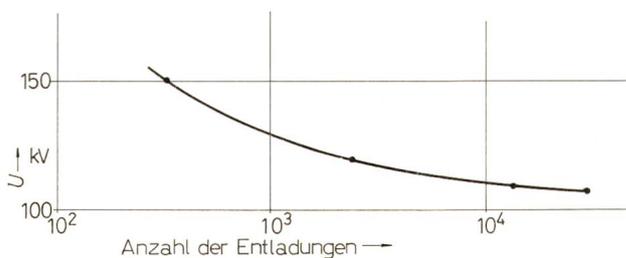


Fig. 14

Durchschlagsspannung in Funktion der Anzahl oszillierender Entladungen
Kabel TT 20/11,5 kV, $1 \times 35 \text{ mm}^2$, ohne Halbleiter auf dem Seil
 U angelegte max. Spannung entsprechend Fig. 13

IR-Spektralphotometrie feststellbar ist. In der Literatur [26...30] wurde nämlich schon früher darauf hingewiesen, dass PE-Filme, die Teilentladungen ausgesetzt sind, eine Oxydation der Oberfläche erleiden, die sich vor allem mit einer Ketongruppe ($> C = O$) bemerkbar macht und die im IR-Spektrum bei $5,78...5,85 \mu\text{m}$ erscheint. Soviele wir wissen, sind aber derartige Untersuchungen an Kabeln bisher nicht gemacht worden. Man hat deshalb Vergleichsversuche unternommen und zwar an 0,6 mm dicken warmgepressten Platten aus frischem PE, aus im Betrieb gealtertem PE, aus künstlich gealtertem PE und aus PE, das vorher dem «Nadeltest» ausgesetzt worden war. Die gemachten 36 Spektrogramme haben folgendes ergeben:

a) Frisches PE niedriger Dichte, aber verschiedenen Schmelzindexes (0,2; 1,2 und 2) verschiedener Herkunft, mit und ohne normale oder besondere Hochspannungs-Stabilisatoren ergab immer identische Spektren; der Gehalt an Stabilisatoren war für die Erkennbarkeit zu gering. Fig. 15 (Spektrogramm Nr. 1) ist ein Beispiel eines solchen Spektrums.

b) PE, das dem Nadelttest unterworfen worden war, hat Spektren ähnlich dem Spektrogramm No. 1 ergeben, ausgenommen PE eines Schmelzindexes 2, ohne Hochspannungs-Stabilisator, das eine Absorption bei 5,78 μm zeigt, was der gesuchten Ketongruppe entspricht (Spektrogramm No. 2).

c) Das dem beschädigten, 6 Jahre im Betrieb gestandenen Kabel entnommene PE ergab Spektren wie die des Spektrogrammes No. 1, die Ketongruppe zeigte sich nicht.

c) Drei Probestücke aus einem neuen unveränderten Kabel (TT 10/6 kV, 25 mm²), aus dem gleichen Kabel mit eingespritztem Wasser im Leiterseil und aus dem gleichen Kabel mit eingeführtem Wasserdampf im Seil, wurden wie folgt unter Spannung gesetzt: 90 h mit 25 kV + 722 h mit 30 kV + 48 h mit 35 kV + 228 h mit 40 kV + 40 h mit 45 kV. Nur das Probestück mit Wasserdampf zeigte durch Auftreten der Ketongruppe bei 5,78 μm , dass eine Veränderung in der Struktur des PE eingetreten ist.

Obwohl also keine Veränderung der chemischen Struktur des PE, das aus dem defekten, 6 Jahre lang betriebenen Kabel stammt, gefunden werden konnte, ist die spektrographische Methode doch aufschlussreich, denn es konnte mit ihr in künstlich gealterten Kabel die Ketongruppe nachgewiesen werden, was beweist, dass das PE unter dem Einfluss von Teilentladungen oxydiert. Diese Methode kann auch zur Kontrolle der Umprägung und Abkühlung des PE herangezogen werden, da sich mit ihr Änderungen in der kristallinen Struktur des PE, die von der Verarbeitung abhängen, feststellen lassen [28].

7. Anwendung von Kabeln mit PE-Isolation und mit vernetzter PE-Isolation für mehr als 60 kV Betriebsspannung

7.1 Allgemeines

Bekanntlich wachsen die dielektrischen Verluste mit dem Quadrat der Spannung ($P_w = U^2 C \omega \text{tg } \delta$); sie nehmen also rascher zu als die Spannung, was sich besonders bei sehr hohen Spannungen bemerkbar macht. Dies hat natürlich Rückwirkungen auf die zulässige normale Belastung von Kabeln sehr hoher Spannung. Man hat darum selbstverständlich nach PE mit niedrigen dielektrischen Verlusten gesucht.

Seit 1957, als in der Schweiz ein 70-kV-Versuchskabel verlegt wurde, sind die Ausgangsstoffe verbessert und die Herstellungsverfahren vervollkommen worden, mit dem Resultat, dass die heutigen PE-Kabel merklich besser sind.

Seit 1957 ist überall in der Welt ein Aufschwung sowohl in der Forschung als auch in der Herstellung und der Anwendung der Hochspannungskabel mit Isolation aus thermoplastischem und aus vernetztem Polyäthylen festzustellen; die hervorstechendsten Verwirklichungen und Nutzenanwendungen sind in den USA, in Frankreich, in Japan und in Deutschland anzutreffen.

7.2 Kabel mit PE-Isolation

7.2.1 Kabel mit umpresster Isolation [11; 14; 18; 19; 31...34]. Die zu Rate gezogenen Veröffentlichungen gestatten ein zusammengefasstes Verzeichnis der in den USA, Frankreich und Deutschland seit 1957 hergestellten und installierten Kabel für Spannungen über 30 kV aufzustellen (Tabelle II).

Innert weniger als 10 Jahren ist also die höchst erreichte Nennspannung 3mal grösser geworden; 1968 wurde sogar ein Versuchskabel für 225 kV ($E_{\text{max}} = 9,5 \text{ kV/mm}$) hergestellt. Das französische 100-kV-Versuchskabel war in der Prüfstation «Fontenay» der EdF installiert und an ein 225-kV-Netz angeschlossen ($E_{\text{max}} = 12,5 \text{ kV/mm}$). Es schlug nach 2100 h durch; auf die Nennspannung von 100 kV bezogen, würde das extrapoliert einer Lebensdauer von 50 Jahren entsprechen. Die meisten der Berichtstatter glauben, dass der gegenwärtig übliche Spannungsgradient von 4...5 kV/mm demnächst auf

| Jahr | USA | Frankreich | Deutschland |
|------|-----------------------------------|---|--|
| 1957 | Kabel $\leq 35 \text{ kV}$ | | |
| 1959 | Kabel $\leq 46 \text{ kV}$ | | |
| 1961 | | Kabel $\leq 30 \text{ kV}$ | |
| 1962 | erstes 69-kV-Kabel | Kabel 63 kV | |
| 1963 | 150 km Kabel für 35 + 46 kV | | |
| 1964 | | 10 km 63-kV-Kabel | |
| 1965 | | Versuchskabel 100 kV im Netz für 225 kV | |
| 1967 | | Versuchskabel 225 kV im Netz für 225 kV | |
| 1968 | 35 km Kabel für 115 kV und 138 kV | 147 km Kabel für 63 kV | Kabel für 60 kV und 110 kV, vorher Kabel $\leq 30 \text{ kV}$ |
| 1970 | | | ca. 15 km Kabel für 110 kV in 33 Längen, wovon 31 zwei bis drei Jahre ohne Durchschlag in Betrieb sind |

8...9 kV/mm erhöht werden kann. Dieser verhältnismässig hohe Wert bedingt aber eine noch peinlichere Auswahl des Ausgangsmaterials und eine noch sorgfältigere Fabrikation. Im allgemeinen haben Kabel mit umpresster PE-Isolation bis zu Spannungen von 70 kV eine jetzt schon hohe Betriebssicherheit.

7.2.2 Kabel mit umpresster Isolation, imprägniert mit elektro-negativem Gas [10; 35; 36]. Mit der Gasimprägnierung des PE wird versucht, die dielektrischen Eigenschaften so zu verbessern, dass höhere Gradienten zugelassen werden können, als für Kabel mit umpresstem PE vermutlich erreichbar sind. Seit 1956 haben sich mehrere Hersteller mit dieser Kabelart befasst, unter anderem 1956 Frankreich mit einem 60-kV-Kabel mit 15 kg/cm² Gasdruck und 1969 USA mit einem 69-kV-Kabel, imprägniert mit Freon unter einem Druck von 1,8 kg/cm².

7.2.3 Kabel mit PE-Bändern, imprägniert mit elektro-negativem Gas [10; 37...39]. Der grundsätzlichen Idee der mit Papier isolierten Kabel folgend, haben mehrere Forscher versucht, die Papierbänder durch PE-Bänder kleiner oder grosser Dichte zu ersetzen, um damit von den Vorteilen geschichteter Isolation zu profitieren, von Vorteilen, die allerdings seit der Verbesserung des Pressverfahrens, geringer geworden sind.

Mehrere derartige Versuchskabel sind hauptsächlich in Frankreich und in Japan konstruiert worden; 66-kV-Kabel mit gewickelter Isolation stehen in Japan im Betrieb. Erwähnenswert ist ein 275-kV-Kabel (E_{max} im Betrieb = 20 kV/mm), wo die Bänder mit SF₆-Gas von 10 kg/cm² Druck «imprägniert» sind und das folgende charakteristische, gemessene Werte zeigt:

$$\text{Dielektrizitätskonstante } \epsilon_r = 2,12 \quad \text{tg } \delta = 0,2...0,4 \quad \% \\ E_{\text{max}} \text{ bei Stoss-Durchschlag} = 80 \text{ kV/mm}$$

Diese Werte sind vielversprechend und lassen eine gute Zukunft solcher Kabel vermuten.

7.3 Kabel mit Isolation aus vernetztem PE

Das vernetzte PE unterscheidet sich im wesentlichen vom PE dadurch, dass es kein thermoplastisches Material ist. Das

Ausgangsmaterial für chemisch vernetztes Polyäthylen ist ein Granulat bestehend aus einem Gemisch von PE niedriger Dichte und hauptsächlich organischen Peroxyden. Dieses umpresste Gemisch vernetzt unter der gleichzeitigen Einwirkung von Druck und Hitze zu einem Material das eine ähnliche Struktur wie vulkanisierter Kautschuk hat. Das Wesen der Vernetzung besteht in der Herstellung von Verbindungen zwischen den Makromolekülen des Polymers, was diesem eine grössere Wärmebeständigkeit verleiht, ohne dass die ausgezeichneten Eigenschaften des PE niedriger Dichte beeinträchtigt werden. Zum Vergleich seien die im Betrieb zulässigen Höchsttemperaturen von Kabeln mit Isolation aus PE, chemisch vernetztem PE und imprägniertem Papier angegeben:

Zulässige Höchsttemperatur am Leiter

| Art der Isolation | PE °C | Vernetztes PE °C | Imprägniertes Papier °C |
|-----------------------|--------------|------------------|-------------------------|
| Normalbetrieb | 50...60 (70) | 90 | 50...80 |
| Überlastung (6...8 h) | — | 130 | — |
| Kurzschluss | 150...160 | 250 | 190 |

Auch bei diesen Kabeln aus vernetztem PE gibt es 2 Arten nämlich: Kabel mit umpresster Isolation und Kabel mit ebenfalls umpresster Isolation, die aber mit einem Silikon-Öl imprägniert ist; dagegen gibt es bis heute noch keine Kabel mit gewickelter Isolation oder mit Gas imprägnierter Isolation.

7.3.1 Kabel mit umpresster Isolation [34; 40...48]. Die chemische Vernetzung des PE (mittels Peroxyden) wurde 1950 entwickelt. Das vernetzte PE wurde aber bis 1959 praktisch nicht verwendet, und erst 1960 erschienen die ersten Veröffentlichungen über seine Benützung in Hochspannungskabeln. Von 1964 an setzte in verschiedenen Ländern eine rasche Entwicklung ein, wie das die nachfolgende Zusammenstellung zeigt.

| Jahr | USA | Japan | Schweden | Deutschland |
|---------------|--|---|----------------------------|----------------------------|
| 1960 bis 1961 | | Beginn der Fabrikation von Drähten und Kabeln | | |
| 1962 | | Erste 66-kV- und 77-kV-Kabel | | |
| 1965 | Kabel bis 40 kV | | | |
| 1967 | Kabel für 15 46 kV und 69 kV | | Erstes Kabel 52...72 kV | |
| 1969 | 18,2 km Kabel für 69 kV Kabel für 138 kV | Kabel für 138 kV | | Kabel bis 30 kV und 110 kV |
| 1970 | | | 22 km Kabel für 52...72 kV | |

Allgemein ist festzuhalten, dass bereits ansehnliche Längen von Kabeln für Spannungen bis zu 72 kV hergestellt wurden und insbesondere, dass 1967 18,2 km Papierkabel für 69 kV durch Kabel mit vernetztem PE ersetzt worden sind. Ausser der grösseren Temperaturbeständigkeit haben diese Kabel die ähnlichen Eigenschaften wie PE-Kabel. Immerhin weist die sehr interessante Publikation [46] auf die mögliche Verbesserung der elektrischen Eigenschaften (E_{max} bei 50 Hz, E_{max} bei

Stoss; Ionisationseinsatz-Spannung) durch Vervollkommnung der Herstellung hin; die dielektrischen Eigenschaften konnten von der ersten bis zur vierten Fabrikationsserie um etwa 50% verbessert werden.

7.3.2 Kabel mit umpresster und Silikon-Öl «imprägnierter» Isolation [49]. Eine japanische Studie hat gezeigt, dass der Widerstand gegen partielle Entladungen und die Durchschlagsspannungen ansteigen, wenn das vernetzte PE mit gewissen Flüssigkeiten «imprägniert» ist. Als günstige Flüssigkeit wurde ein Silikon-Öl gefunden. Die Resultate des ersten, für 66 kV und 100 mm² gebauten Kabels lassen vermuten, dass Kabel mit einer betriebsmässigen Feldstärke von 20 kV/mm hergestellt werden können. Dieser Wert entspricht praktisch dem Wert einer Kabelisolation aus SF₆-imprägnierten PE-Bändern.

8. Schlussfolgerungen

Dieser Überblick über die erreichten Verbesserungen in der Herstellung von Hochspannungskabeln mit umpresster PE-Isolation zeigen deutlich, dass diese Kabel mit grosser Betriebssicherheit für Spannungen bis und mit 60 kV benutzt werden können. Mit dem chemisch vernetzten PE ist ein neues Isoliermaterial erschienen, das im Kabel höhere Betriebstemperaturen als bisher zulässt; dieses Isoliermaterial wird nicht nur für Hochspannung, sondern auch für Niederspannung immer häufiger gebraucht.

Die an Kabeln über 60 kV in der ganzen Welt vorgenommenen Entwicklungen zeigen — obwohl hier nicht vollständig dargelegt — dass es möglich ist, Isoliermaterialien niedriger dielektrischer Verluste zu erhalten. Anlässlich der CIGRE 1970 hat sogar die EdF²⁾ (*M. Constantin*) erklärt, dass in ihrem Netz von 1971 an Kabel mit umpresstem PE für 225 kV benützt werden. Andererseits scheinen nach den bisherigen Resultaten auch PE-Kabel mit Gasimprägnierung oder Ölimprägnierung für Spannungen von mehr als 150 kV gute Aussichten zu haben; dem bei diesen Kabeln in Kauf zu nehmenden Verlust der einfachen Betriebsweise gewöhnlicher PE-Kabel stehen die besonders interessanten dielektrischen Eigenschaften gegenüber.

Literatur

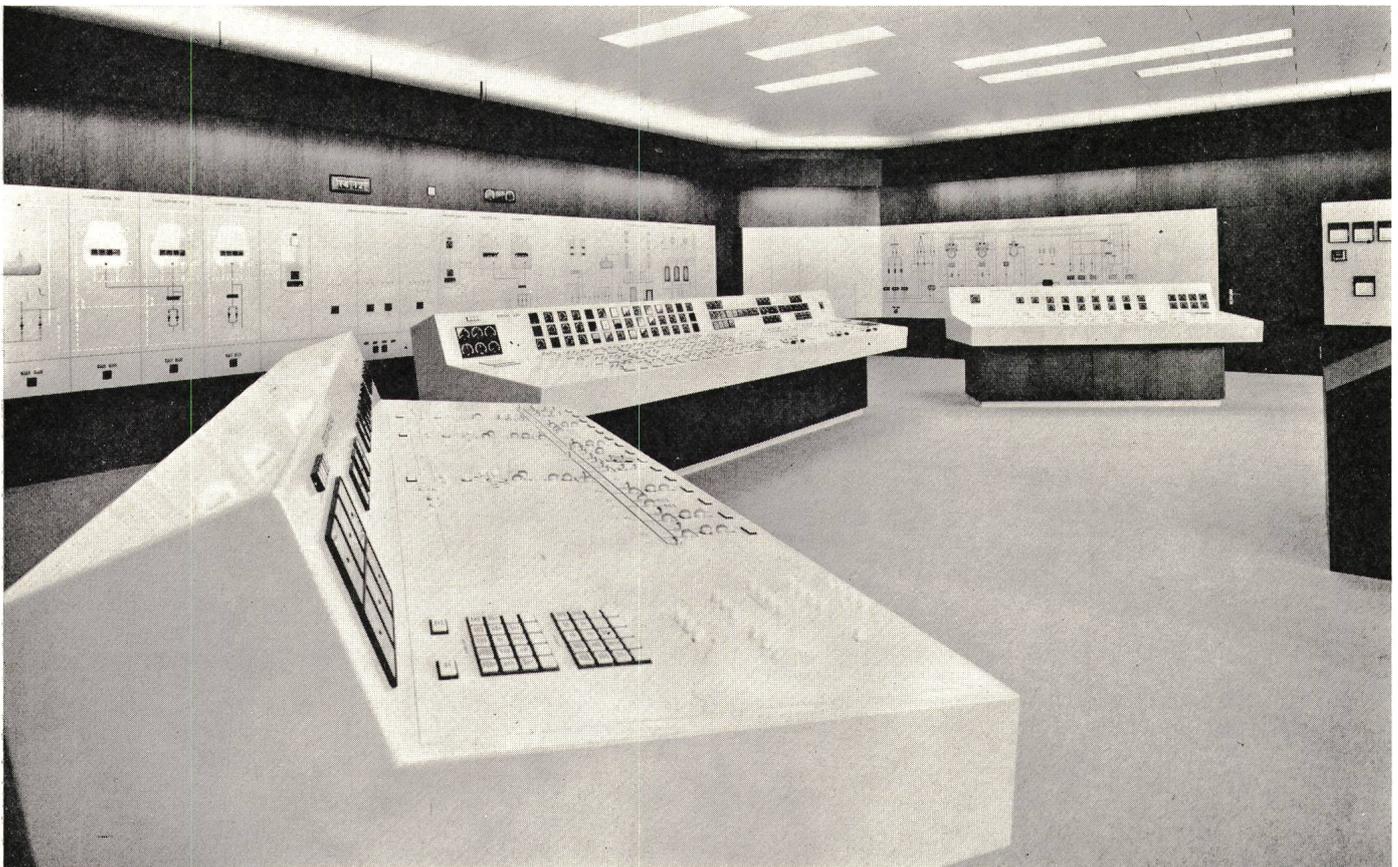
- [1] *W. R. Freeman*: Plastics in cables. *Electr. Manufacture* 7(1962)4, p. 5...17.
- [2] *M. M. Suba*: Polyethylene in power cables. *Wire and Wire Products* 33(1958)10, p. 1207...1210 + 1270...1271.
- [3] *G. O. Wardrop* and *J. C. Norton*: The use and performance of polyethylene power cable in chemical plants. Second symposium on polyethylene wire and cable insulation. AIEE winter general meeting, New York, January, 21...25, 1957. AIEE Publication No. S 95. New York, American Institute of Electrical Engineers, 1958, p. 31...34.
- [4] *F. F. Humbel*: Polyethylene-insulated power cables in Europe. *Wire and Wire Products* 42(1967)2, p. 262...270.
- [5] *H. J. Hair*: Polyäthylen-Hochspannungskabel. *VDI-Nachrichten* 23(1969)17, S. 4.
- [6] *T. Yasui* and *T. Hayami*: Electrical deterioration in rubber- and plastic-insulated cables. *Sumitomo Electric Technical Review* -(1969)12, p. 27...43.
- [7] *Recommandations pour les câbles et conducteurs à haute tension à isolation thermoplastique*. Publ. ASE 0216.1959.
- [8] *Règles et recommandations pour la coordination de l'isolement des installations à courant alternatif à haute tension*. Publ. ASE 3001.1964.
- [9] *Essais de choc des câbles et de leurs accessoires*. Publ. CEI 230, 1966.
- [10] *J. M. Oudin* et *C. A. Flamand*: Emploi des isolations thermoplastiques dans la fabrication des câbles à courant continu et alternatif. Rapport CIGRE No. 209, 1962.
- [11] *J. M. Oudin* e. a.: Recherches et réalisations françaises dans le domaine des câbles à haute et à très haute tension. Rapport CIGRE No. 230, 1964.
- [12] *U. Östreich* und *K. Morkel*: Protothen-Hochspannungskabel. *Siemens Z.* 39(1965)4, S. 402...404.
- [13] *F. H. Kreuger*: Accessoires pour câbles à haute tension à isolement plastique. Rapport CIGRE No. 201, 1966.
- [14] *F. H. Kreuger*: Essais de longue durée sur les câbles isolés au polyéthylène. Méthodes et Critères. Rapport CIGRE No. 21-02, 1968.
- [15] *W. Weibull*: A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics* 18(1951)3, p. 293...297.

²⁾ EdF = Electricité de France.

- [16] *R. Boutet et C. F. Schrobiltgen*: Câble haute tension à isolation thermostastique pour réseaux à 70 kV. Essais et réalisation. Rapport CIGRE No. 208, 1964.
- [17] *G. J. Crowdes, G. H. Hunt et P. H. Ware*: Recherches et progrès dans le domaine de l'isolement synthétique pour câbles à haute tension. Rapport CIGRE No. 220, 1964.
- [18] *H. J. Heinemann*: Entwicklung, Prüfung und Einsatz von 110-kV-Kunststoffkabeln. ETZ-A 91(1970)3, S. 149...152.
- [19] *M. Charoy et R. Jocteur*: 225 kV cables with extruded polyethylene insulation. In: Progress in overhead lines and cables for 220 kV and above. IEE Conference Publication 44. London, Institution of Electrical Engineers, 1968, p. 260...268.
- [20] *D. W. Kitchin et O. S. Pratt*: An accelerated screening test for polyethylene high-voltage insulation. Trans. AIEE Part III, Power Apparatus and Systems 81(1962)60, p. 112...121.
- [21] *O. S. Pratt*: A new form of needle test for polyethylene insulation. Trans. IEEE PAS 87(1968)7, p. 1609...1613.
- [22] *F. Feichtmayr et F. Würstlin*: Le polyéthylène utilisé comme isolant de câbles de transport d'énergie à haute tension. Bull. ASE 61(1970)2, p. 64...69.
- [23] *G. Mole et F. H. Kreuger*: Mesure des décharges sur des câbles de grande longueur. Comment éviter les erreurs dues à la superposition des ondes de propagation. Electra -(1969)8, p. 53...82.
- [24] Identification des décharges. Electra -(1969)11, p. 61...98.
- [25] *G. S. Eager, G. Bahder et D. A. Silver*: Corona detection experience in commercial production of power cables with extruded insulation. Trans. IEEE PAS 88(1969)4, p. 342...364.
- [26] *M. Mayoux*: Sur la modification de la structure du polyéthylène soumis à l'action des décharges partielles dans l'air. Thèse de l'Université de Toulouse, 1966.
- [27] *R. F. Grossmann et W. A. Beasley*: Effects of corona discharges upon polyethylene. Journal of Applied Polymer Science 2(1969)5, p. 163...165.
- [28] *P. J. Luongo et R. Salovey*: Infrared spectra of irradiated polyethylene. Journal of Applied Polymer Science 7(1963)6, p. 2307...2318.
- [29] *Y. Toriyama a. o.*: Degradation of polyethylene by partial discharge. Trans. IEEE EI 2(1967)2, p. 83...92.
- [30] *Bui Ai e. a.*: Etude de l'action des décharges partielles sur les isolants. Rev. Gén. Electr. 78(1969)1, p. 53...66.
- [31] *J. M. Oudin*: Conférence internationale des grands réseaux électriques: Câbles à haute tension. La Technique Moderne 59(1967)3, p. 116...120.
- [32] *N. D. Kenney et M. J. Koulopoulos*: Installations de câbles à 115 kV et 138 kV isolés au polyéthylène et éléments d'évaluation des câbles. Rapport CIGRE No. 21-07, 1968.
- [33] *A. Devaux e. a.*: Fiabilité et développement vers les hautes tensions des câbles à isolation synthétique. Rapport CIGRE No. 21-10, 1968.
- [34] *M. E. Wadsworth*: 69-kV solid dielectric cable to feed urban sub. Electr. Wld. 172(1969)9, p. 23...24.
- [35] *R. C. Blankenburg, W. W. Steinke et J. Stolpe*: Experimental installation of 69-kV synthetic-insulated underground-cables and components. Trans. IEEE PAS 89(1970)2, p. 304...312.
- [36] *F. H. Kreuger*: Câble isolé au polyéthylène à «imprégnation» gazeuse. Rapport CIGRE No. 21-02, 1970.
- [37] Disappointing results with lapped polyethylene cable insulation. Electr. Rev. 181(1967)-, p. 195.
- [38] *K. Hosokawa, K. Maruta et M. Toba*: Extra-high-voltage gas-filled-type plastic-insulated power cable; In: Progress in overhead lines and cables for 220 kV and above. IEE Conference Publication 44, London, Institution of Electrical Engineers, 1968, p. 148...152.
- [39] *R. Kaneko, M. Nakagawa et H. Otaka*: Dielectric stability of gas-pressurized high-density polyethylene tape insulation under condition of overvoltage. Trans. IEEE PAS 89(1970)3, p. 478...485.
- [40] *M. Izuchi a. o.*: Crosslinked polyethylene insulated cables. Sumitomo Electric Technical Review -(1963)1, p. 52...58.
- [41] *M. M. Suba*: Vulcanizable polyethylene for wire and cable. Terminal report. Wire and Wire Products 40(1965)1, p. 85...89 + 140...141.
- [42] *A. L. McKean, F. S. Oliver et S. W. Trill*: Cross-linked polyethylene for higher voltages. Trans. IEEE PAS 86(1967)1, p. 1...10.
- [43] *J. R. Flesher*: Vulcanizable polyethylene and high voltage cable insulation. Wire and Wire Products 42(1967)4, p. 622...625 + 684...685.
- [44] *Y. Fujisawa a. o.*: Performance of 66-77-kV cross-linked polyethylene insulated cable and new developments. Trans. IEEE PAS 87(1968)11 p. 1899...1907.
- [45] Kunststoffisolierte Hochspannungskabel. ETZ-B 21(1969)26, S. 598.
- [46] Neues aus der Kabeltechnik. Techn. Mitt. AEG-Telefunken 60(1970)2, S. 142...143.
- [47] *L. M. Stoman*: Advantages of power cables with x.l.p.e. insulation. Electr. Times 157(1970)12, p. 87...91.
- [48] *T. Lundgren, S. Wretemark et H. O. Hansson*: Etudes sur les impuretés et les vides dans les câbles isolés au polyéthylène réticulé. Extrémités préfabriquées. Rapport CIGRE No. 21-02, 1970.
- [49] *T. Hayami*: Development of liquid-filled type cross-linked polyethylene cable. Trans. IEEE PAS 88(1969)6, p. 897...904.

Adresse der Autoren:

R. Mühlethaler, R. Ruchet, M. Schmid et J. Wagner, S. A des Câbleries et Tréfileries de Cossonay, Cossonay-Gare.



Kommandoraum der CERN in Genf